Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES
travaillent pour vous !

MISSION

- Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-877-221-7046

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, mai 2005

Bilan de connaissances sur les dispositifs de détection de personnes lors des manœuvres de recul des véhicules dans les chantiers de construction

BILANS DE CONNAISSANCES

RAPPORT

Stéphane Blouin
Sécurité-ingénierie, IRSST

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca

Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles de l'auteur.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

SOMMAIRE

Au cours des dernières années, on dénombre plusieurs cas d'accidents mortels mettant en cause les manœuvres de recul de véhicules dans les chantiers de construction. Ces accidents surviennent malgré la présence d'un avertisseur sonore opérationnel et conforme aux règlements en vigueur. Il s'avère donc nécessaire d'équiper de tels véhicules de dispositifs plus sécuritaires. À cet effet, ce rapport présente un bilan de connaissances visant la documentation et l'analyse des techniques actuelles de détection de personnes. Une attention toute particulière est portée sur l'adaptabilité des divers principes et techniques de détection au domaine de la construction, plus spécifiquement aux camions à bennes basculantes.

La présente démarche de recherche comporte des visites de chantiers de construction permettant une familiarisation avec les conditions et contraintes du milieu, ainsi qu'une cueillette d'information basée sur la littérature scientifique et technique (groupes de recherches, manufacturiers, normes, etc.). Suite aux visites de chantiers, nous constatons que le positionnement des alarmes de recul est susceptible de générer des interférences pouvant diminuer l'audibilité du signal sonore. En ce sens, il est préférable de référer à des normes prescrivant un certain niveau de bruit à l'arrière d'un véhicule muni d'une alarme sonore. De plus, l'alarme sonore devrait s'enclencher automatiquement lors de la mise en marche arrière du véhicule, au lieu de dépendre d'une activation manuelle de la part du conducteur.

En plus de présenter les principes de détection d'obstacle, nous procurons les limites techniques associées à certaines technologies. Entre autres choses, la revue de la littérature nous a permis de répertorier plusieurs systèmes de détection commercialement disponibles. Plus particulièrement, nous avons recueilli des résultats expérimentaux effectués sur des véhicules de chantier de construction (camions à benne, camion minier, etc.). Il s'ensuit plusieurs recommandations pour l'installation des capteurs sur les véhicules en question. L'ensemble de ces travaux révèle également l'importance de minimiser l'occurrence des fausses alarmes afin de conserver la vigilance du conducteur. Pour cette même raison, plusieurs auteurs favorisent les systèmes de détection mettant en commun plusieurs types de capteurs de nature différente.

Nous concluons cette étude en proposant une avenue de recherche afin d'améliorer les chances d'évitement de collision entre un véhicule de chantier en mouvement et une personne se trouvant à proximité.

105-06291/

REMERCIEMENTS

Le contenu du présent rapport n'aurait pu être ce qu'il est sans la collaboration de plusieurs intervenants. La grande majorité de ces collaborateurs sont des partenaires en santé et sécurité au travail oeuvrant soit pour l'IRSST, la CSST ou pour une firme privée.

Nous tenons à remercier tout particulièrement Monsieur Claude Rochon de la CSST afin de nous avoir permis d'effectuer deux visites de chantier dans la région de Montréal dans le but de récolter de l'information pertinente au présent rapport. La tenue de ces visites a été grandement facilitée grâce à la participation de d'autres intervenants de la CSST, en l'occurrence, Jean-Pierre Chevrier, Louise Cloutier, ainsi que Gilberto La Manna. Nous avons également bénéficié d'une grande coopération lors des visites de chantiers. Plus précisément, Alain Carmel et Jean-Marc Gladu ainsi que Robert Amos nous ont offert un support indéfectible pour la cueillette d'information sur les chantiers de construction.

Finalement, je tiens à remercier Jérôme Boutin de l'IRSST pour son aide technique lors de la prise et de l'analyse des mesures de niveau de bruit.

TABLE DES MATIÈRES

Page

SOMMAIRE i

REMERCIEMENTS iii

1. INTRODUCTION 1

2. SYSTÈME DE DÉTECTION DE PERSONNE 3

3. PRINCIPES DE DÉTECTION 5
   3.1 Attributs humains 6
   3.2 Principes généraux 6
   3.3 Évitement de collisions 10

4. NORMES ET RÈGLEMENTS 13

5. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX 17
   5.1 Alarmes sonores de recul 17
   5.2 Ultrasons 18
   5.3 Capteurs à effet capacitif 19
   5.4 Caméra 19
   5.5 Capteurs à ondes radios 19
   5.6 Capteur à champ magnétique 20
   5.7 Études comparatives 20
   5.8 Multi-systèmes 22

6. DISCUSSION 25

7. CONCLUSION 29

8. RÉFÉRENCES 31

9. ANNEXES 35
   9.1 Niveau de bruit - Pondération A 35
   9.2 Chantier de Construction #1 36
      9.2.1 Contexte 36
      9.2.2 Observations 36
      9.2.3 Résultats 38
   9.3 Chantier de construction #2 39
      9.3.1 Contexte 39
      9.3.2 Observations 39
      9.3.3 Résultats 40

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1 : Proportion des collisions évitées par une automobile (tiré de [20]) 11
Tableau 2 : Dimensions maximales de la zone localisée à l'arrière d'un véhicule 15
Tableau 3 : Nature des capteurs testés en [7] 18
Tableau 4 : Nature des capteurs testés en [9] 20
Tableau 5 : Nature des capteurs testés en [8] 21
Tableau 6 : Nature des capteurs testés en [20] 21
Tableau 7 : Résultats expérimentaux [20] 22
Tableau 8 : Systèmes de détection commerciaux 26
Tableau 9 : Valeurs moyennes d'amplitude de bruit (dBA) 38
Tableau 10 : Type d'équipement avec alarmes de recul 39
Tableau 11 : Valeurs moyennes d'amplitude de bruit (dBA) 40

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Étapes requises pour la détection d'obstacles (tiré de [16]) 5
Figure 2 : Longueurs d'onde électromagnétiques (tiré de [24]) 7
Figure 3 : Distribution du temps de réaction d'un conducteur (tiré de [20]) 10
Figure 4 : Forme de la zone de détection/mesures localisée à l'arrière d'un véhicule 15
Figure 5 : Niveau de bruit avec pondération A 35
Figure 6 : Arrière d'un camion à benne 37
Figure 7 : Arrière d'un second camion à benne 37
Figure 8 : Aperçu du chantier 37
Figure 9 : Second aperçu du chantier 37
Figure 10 : Niveau continu équivalent de bruit sans alarme de recul 38
Figure 11 : Niveau continu équivalent de bruit avec alarme de recul 38
Figure 12 : Rouleau compacteur 39
Figure 13 : Plate-Forme mobile 39
Figure 14 : Pelle mécanique 39
Figure 15 : Niveau continu équivalent de bruit sans alarme de recul 40
Figure 16 : Niveau continu équivalent de bruit avec alarme de recul 41

1. INTRODUCTION

Au cours des dernières années, on dénombre plusieurs cas d'accidents mortels mettant en cause les manœuvres de recul de véhicules dans les chantiers de construction. À titre d'exemple, depuis juin 2002, on dénombre au Québec au moins quatre cas d'accidents mortels mettant en cause des véhicules de chantiers de construction. Ces accidents ont été répertoriés lors d'activités de construction, de déneigement, et d'exploitation forestière et ils mettent souvent en cause des véhicules du type transporteur ou camion à benne basculante. Dans tous les cas, l'accident est survenu suite à la mise en marche arrière du véhicule. À ce titre, l'article 3.10.12 du Code de sécurité pour les travaux de construction [23] exige que ce type d'engin soit muni d'un avertisseur sonore de recul. Or, il s'avère que les accidents surviennent malgré la présence d'un avertisseur opérationnel et conforme à l'article ci-haut mentionné.

Il existe plusieurs agents causals pouvant expliquer l'inefficacité des dispositifs d'avertissement sonores à prévenir un travailleur de la mise en marche arrière d'un véhicule se trouvant à proximité. Parmi ceux-ci, on compte l'accoutumance du personnel aux avertisseurs sonores et la perte d'efficacité de l'avertisseur dû, entre autre chose, à des perturbations sonores (habituellement générées par des équipements avoisinants), à la perte d'acuité sonore du personnel attribuable à une longue exposition au bruit et au port d'équipement ou de vêtements gênant à la perception sonore du personnel. Il s'ensuit que les dispositifs d'avertissement sonores peuvent parfois s'avérer inefficaces à prévenir un travailleur de l'imminence du danger découlant de la mise en marche arrière d'un véhicule. Cela est particulièrement vrai en ce qui concerne les sites regroupant un grand nombre d'engins bruyants.

En réponse aux faits décrits ci-haut, ce rapport présente un bilan de connaissances visant la documentation et l'analyse des techniques actuelles de détection de personnes. De plus, cette étude comporte un volet concernant l'identification des normes et des critères de sécurité devant s'appliquer à ces dispositifs de détection. Une attention toute particulière porte sur l'adaptabilité des divers principes et techniques de détection au domaine de la construction, plus spécifiquement aux camions à bennes basculantes. Des visites de chantiers de construction ont permis une familiarisation avec les conditions et contraintes du milieu pouvant guider la sélection de certaines technologies.

2. SYSTÈME DE DÉTECTION DE PERSONNE

Dans le contexte actuel, la principale fonction d'un système de détection de personne et de détecter la présence d'humain à proximité d'un véhicule en mouvement afin d'éviter une situation potentiellement dangereuse, en l'occurrence, une collision entre le véhicule et la personne dans le cas où cette dernière ne pourrait éviter l'impact pour quelconque raison.

Contrairement aux avertisseurs sonores par lesquels la sécurité du personnel à risque dépend presque exclusivement de leur perception auditive, le système de détection d'humains se veut indépendant de la perception auditive des travailleurs. De plus, il est entendu que le conducteur d'un véhicule sera averti dans le cas échéant où une présence humaine est détectée (un tel dispositif d'avertissement s'appelle « warning system » et est brièvement abordé dans le présent rapport). En ce sens, un système de détection de personne augmente considérablement la responsabilité des conducteurs des véhicules des chantiers de construction. Ainsi, en présence d'une alarme sonore de recul et d'un système de détection, la responsabilité de la sécurité est partagée entre les principaux intervenants du milieu.

Les spécifications de fonctionnement d'un système de détection de personne sont relativement exigeantes. Tel que mentionné en [21], « le principal défi est de trouver des capteurs ayant une portée de mesure convenable, une résolution, un temps de réponse et une fiabilité de la reconnaissance afin de rencontrer les hauts standards mis en place par les législations relatives aux systèmes de sécurité ». En effet, on s'attend à ce que le dispositif puisse détecter des humains qu'ils soient en position debout ou accroupie, mobiles ou non, et portant des vêtements pouvant varier selon les saisons. La détection doit être également garantie en présence de diverses conditions environnementales (humidité, poussière, variations de température, etc.). Compte tenu que le système de détection de personne sera installé sur des véhicules de chantiers de construction, son fonctionnement doit être affecté le moins possible par les vibrations du véhicule et les éclaboussures (boue, neige, etc.). Dans le but d'assurer une vigilance de la part du conducteur, le système de détection de personne doit générer des fausses alarmes le moins souvent possible. Afin de réduire les chances d'habituation (tendance à ignorer un stimulus lorsque celui-ci devient familier [6]) des travailleurs exposés au danger, il vaudrait mieux que les alarmes ne soient pas trop fréquentes. Idéalement, elle devrait se déclencher uniquement en cas de danger d'une éventuelle collision.

Dans le cadre du présent rapport, la recherche bibliographique porte d'une manière générale sur la détection d'obstacles, lesquels incluent évidemment la présence humaine. En fait, seul quelques rares dispositifs sont activés par des attributs exclusivement humains. Comme le mandat actuel porte sur de l'équipement mobile lourd et pouvant se déplacer à une vitesse relativement élevée, certains dispositifs actionnés par un contact physique et de courte portée tels que les tapis sensibles ou les pare-chocs flexibles n'ont pas été couverts. L'ensemble des dispositifs présentés dans ce rapport ne requiert donc pas de contact physique entre le véhicule et la personne se trouvant à proximité.

3. PRINCIPES DE DÉTECTION

D'une manière générale, on peut détecter un obstacle ou la présence d'humain soit directement ou indirectement. La reconnaissance d'obstacle ou d'humains par méthode directe implique que la mesure physique provenant des capteurs permette directement de déceler leur présence ou absence. Typiquement, ces capteurs sont basés sur la reconnaissance d'un attribut humain (rayonnement thermique intrinsèque, effet capacitif, etc.) ou non (volume, mouvement, etc.) [16].

Dans le présent ouvrage, on regroupe sous les méthodes indirectes les dispositifs de détection requérant une étape additionnelle de modélisation et de traitement des données. En effet, la reconnaissance d'objets, de formes ou de dimensions est d'avantage le domaine de la perception par modélisation (connaissance *a priori*) qui vise plutôt à discerner les objets comme le font naturellement les humains [1]. Sous cette catégorie, on retrouve les techniques de vision dont le principal capteur est une caméra. La Figure 1 illustre les voies directes et indirectes de détection d'obstacle.

On distingue les capteurs actifs de ceux qui sont passifs. Un capteur passif mesure une énergie entièrement fournie par un phénomène physique tandis que le capteur actif fournit une énergie au milieu pour effectuer des mesures [21]. La plupart des capteurs présentés dans ce rapport sont de type actif.

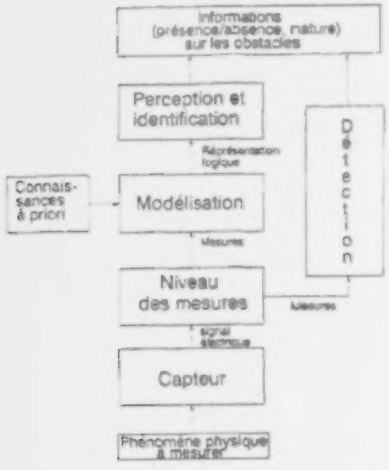

Figure 1 : Étapes requises pour la détection d'obstacles (tiré de [16])

3.1 Attributs humains

Parmi les attributs ou caractéristiques physiques que l'on peut mesurer directement afin de déceler une présence humaine, il y a le rayonnement thermique, l'effet capacitif, le volume et la forme. Au cours de cette section, nous effectuons une brève revue de ces divers principes et de leur applicabilité.

Tout humain émet un rayonnement thermique car le corps possède une température autorégularisée à 37°C. Ce rayonnement est riche en infrarouge ayant une longueur d'onde de l'ordre de 10 microns. Ce rayonnement est toutefois absorbé par les vêtements portés par les travailleurs, particulièrement en hiver. De plus, de faux déclenchements peuvent survenir car beaucoup d'autres objets (une ampoule électrique par exemple) émettent des radiations dans la même zone spectrale que le corps humain [15].

Le corps humain occupe un volume suffisant pour être potentiellement détecté en tant qu'obstacle. Un véhicule équipé d'un système de détection d'obstacle par télémétrie devrait en conséquence éviter les humains qui se trouvent sur son passage. Malheureusement, cette solution ne fonctionne pas si l'humain est couché ou encore si seulement un bras ou une jambe se trouve sur le passage. De plus, la distinction entre un membre humain et un obstacle de volume équivalent, mais de moindre intérêt, serait difficile.

Quant à la reconnaissance de forme typiquement humaine, peu de méthodes fiables ont été démontrées jusqu'à ce jour [15]. Les systèmes de détection par modélisation et perception doivent manipuler un grand volume de données généralement multidimensionnelles, ce qui augmente sensiblement le temps de détection. Toutefois, le développement rapide d'ordinateurs à grande capacité de calcul laisse entrevoir un avenir prometteur à cette technologie. Pour plus d'information sur les différents systèmes de vision avec traitement d'images, le lecteur peut référer à [16] et [21].

Par effet capacitif, on entend un dispositif composé d'éléments métalliques disposés sur le véhicule et formant avec la terre un condensateur dont la capacité du champ électrique varie en présence d'humain [18]. Le principal inconvénient d'un système par effet capacitif est la fréquence élevée des faux déclenchements. De plus, le système est sensible aux conditions ambiantes (température et humidité), aux interférences radios et à la poussière.

Selon les faits présentés ci-haut, il s'avère qu'à ce jour les attributs humains peuvent être complexes à discerner dans un environnement non structuré comme peut l'être un chantier de construction. Cela justifie d'autant plus la tendance à considérer la détection d'obstacles au sens général, et non seulement la détection d'humains, malgré l'augmentation de la fréquence des alarmes occasionnées par la détection d'obstacles d'intérêt moindre (feuilles mortes, chat, etc.).

3.2 Principes généraux

Deux types d'ondes servent souvent aux capteurs sans contact pour la détection d'obstacles : les ondes mécaniques et les ondes électromagnétiques. Les ondes mécaniques nécessitent un milieu non-vide pour se propager alors que les ondes électromagnétiques franchissent des distances

illimitées dans le vide. Les ondes sonores (dont les ultrasons) sont des ondes mécaniques longitudinales dont la vitesse de propagation dépend de l'élasticité et de la densité du milieu [1].

Les ondes électromagnétiques utilisées par des capteurs de détection d'obstacle sont : les ondes visibles, les ondes infrarouges, les micro-ondes, et les ondes millimétriques. La Figure 2 illustre la plage des longueurs d'ondes électromagnétiques.

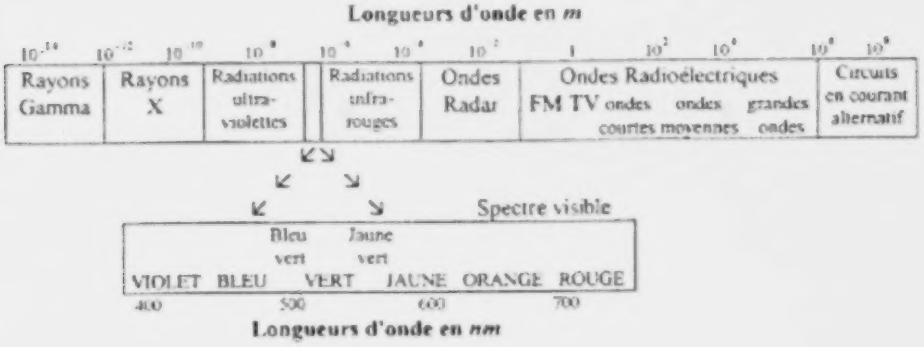

Figure 2 : Longueurs d'onde électromagnétiques (tiré de [24])

La diffusion caractérise une perte d'amplitude de l'onde due à de l'absorption et de la réflexion avec des corps ayant une dimension de même ordre de grandeur que la longueur d'onde. Par exemple, la sensibilité des ondes courtes (visibles et infrarouges) aux conditions atmosphériques est attribuable à diffusion [1].

Plusieurs technologies de capteurs actifs sont basées sur l'émission, la détection et la mesure (d'atténuation, de temps de vol, ou de déphasage) de la réflexion d'une onde mécanique (sonore, ultrason) ou électromagnétique (infrarouge, radio, micro-onde, etc.). Parmi les autres types de capteurs rencontrés, il y a ceux basés sur une caméra vidéo, l'identification par radiofréquence et l'identification par champ magnétique. Il est à noter que certains des capteurs ci-haut mentionnés requièrent le port d'une balise (aussi appelé « transpondeur ») par le personnel à risque. Dans la littérature, les acronymes pour les capteurs les plus courants sont le radar (RAdio Detection And Ranging), le sonar (SOund Navigation And Ranging), le sodar (SOund Detection And Ranging) et le lidar (LIght Detection And Ranging). Dans les paragraphes qui suivent, nous effectuons une revue des divers types de capteurs énumérés et de leurs propriétés.

Un télémètre à laser (ou lidar) est un capteur actif fonctionnant sur le principe d'émission et de réflexion d'une onde lumineuse. Les données d'un télémètre à laser installé sur un véhicule sont obtenues par balayage sous forme d'un plan ou d'une image 3-D. De ce fait, les obstacles de faible taille au-dessous du plan balayé ne sont pas détectés. De plus, lorsque le véhicule est en tangage, le sol peut être perçu comme un obstacle générant ainsi de fausses alarmes. Du point de vue expérimental, les mesures sont rapides et précises [16]. Toutefois, ce type de capteur est sensible aux conditions environnementales (température, pluie, neige, etc.) et un entretien

fréquent est possible dû au fait que les impuretés issues de son exposition à l'environnement affectent la mesure. Il faut également mentionner que l'effet thermique de ce capteur peut être dangereux pour les yeux [21].

Le fonctionnement d'un sonar est similaire à celui d'un lidar, à l'exception de la nature de l'onde émise. Les ondes ultrasoniques sont des ondes mécaniques lentes et sensibles aux conditions de température et d'humidité. La propagation des ultrasons dans le milieu aérien limite leur usage à des portées de quelques mètres tout au plus, c'est-à-dire un ordre de grandeur inférieur à celui d'un lidar [21]. De plus, les capteurs à ultrasons sont connus pour déclencher souvent d'une manière intempestive, créant ainsi de fausses alarmes, dû à des réflexions parasites des ondes sur les éléments environnants [18]. Leur popularité s'explique par leur coût peu élevé. Du point de vue expérimental, la répétitivité des mesures est faible et le risque de fausses mesures est toujours présent. De plus, la prise de mesure est lente pour un véhicule en mouvement [16]. Le fait que la membrane de l'émetteur doive se stabiliser avant de pouvoir détecter l'écho de l'onde réfléchie implique qu'il existe une zone à proximité du capteur où un objet ne peut être détecté [21].

Tout comme le lidar, le radar est un capteur actif fonctionnant sur le principe d'émission et de réflexion d'une onde électromagnétique. La plupart des radars opèrent avec les micro-ondes et sont du type suivant : impulsionnel, à très large bande (« ultrawide band »), à effet Doppler et à fréquence modulée et émission continue. Tout comme le sonar d'un sous-marin, le radar impulsionnel émet un fouettement (« ping ») et attend l'écho. Un radar à effet Doppler détecte le mouvement relatif d'un objet par déphasage de l'onde réfléchie. Conséquemment, un tel dispositif ne peut détecter suffisamment rapidement un objet stationnaire se trouvant à proximité d'un véhicule qui amorce un mouvement. De plus, par le fait même du mouvement du véhicule, tous les objets environnants sont, par relativité de point de vue, en mouvement. Les radars à très large bande sont avantageux car (i) ils ne sont pas basés sur l'effet Doppler, (ii) ils sont insensibles aux interférences générées par d'autres appareils et (iii) ils peuvent détecter des objets de petite taille tels que des câbles suspendus. En [21], on rapporte un nouveau type de radar s'appelant MIR ou « Micropower Impulse Radar ». La particularité du MIR vient du fait qu'il émet toutes les secondes un million d'ondes ultracourtes. De par ces ondes courtes, le MIR opère le long d'une large bande de fréquences radios et est moins susceptible d'interférer avec d'autres radars en plus d'avoir de meilleures capacités à pénétrer l'eau, la glace et la boue. Ce type de radar possède également une grande précision et requiert une faible alimentation. La compagnie Amerigon basée à Monravia en Californie possède la licence de la technologie MIR.

Les radars ont l'avantage de pouvoir fonctionner dans la plupart des conditions atmosphériques (pluie, brouillard, neige) [16]. En général, la distance de détection maximale atteignable par un radar dépend de la dimension et des matériaux constituant l'obstacle. Quoique les objets plats métalliques soient facilement détectables, ceux de formes irrégulières, sans contenu métallique, et à basse teneur en eau ne sont pas de bons réflecteurs et peuvent n'être détectés qu'à faible distance [9]. En fait, les paramètres de conception comme la fréquence d'opération, le type de modulation et le patron de radiation doivent être choisis en fonction des performances désirées. Un radar est relativement coûteux et peut aussi ne pas détecter les vitesses faibles et les déplacements latéraux par rapport au capteur [18]. Pour terminer, l'utilisation des radars à micro-ondes pourrait avoir des effets sur la santé des personnes exposées au rayonnement [21].

Les systèmes d'identification par radiofréquence sont normalement composés d'une balise portée par une personne, d'un détecteur de balise(s) et d'une interface d'opération ou d'une unité d'affichage d'alarmes [9]. De tels systèmes peuvent détecter sans vue directe, soit par réflexion sur des objets ou soit par effet de dispersion sur les bordures des obstacles. Une balise peut être active ou passive. Dans le cas d'une balise passive, le détecteur transmet continuellement un signal qui active la balise si celle-ci se trouve dans la zone de détection. Par la suite, la balise répond au détecteur par un signal spécifique. Habituellement, les balises passives requièrent peu de puissance et de maintenance et leur coût est minime. Cependant, leur portée est inférieure à celle des balises actives qui émettent des ondes continuellement et nécessitent davantage d'énergie et d'espace. Par le fait même, une balise active est plus coûteuse. Dans le cas d'une balise active, le détecteur peut être passif et simplement attendre les ondes transmisses par la balise. Quoiqu'en principe un système de détection par fréquence radio ne doive pas générer de fausses alarmes, les signaux radios peuvent subir des interférences provenant du phénomène multivoie (« multipath ») ou de d'autres sources d'ondes radios [9]. Pour un tel système, le nombre de balises requises peut être élevé (possiblement pour tous les travailleurs et tous les véhicules) et seul un certain niveau de complexité (c'est-à-dire un coût plus élevé) offre une performance améliorée. Malheureusement, cette approche peut donner l'illusion de sécurité même si le transmetteur cesse de fonctionner [15].

Le dispositif de détection par champ magnétique se compose habituellement d'une unité émettrice d'un champ magnétique montée sur un véhicule ainsi que de balise(s) active(s) portée(s) par des personnes. L'émetteur génère un courant au travers d'une antenne circulaire avec plusieurs boucles produisant ainsi un champ magnétique autour de l'antenne. Chaque balise comporte un récepteur ainsi que l'électronique nécessaire afin de calculer le champ magnétique résultant sur le récepteur. De cette manière, la distance entre l'émetteur et le récepteur peut être déterminée. Typiquement, les basses fréquences sont favorisées car les champs magnétiques à hautes fréquences peuvent être altérés par des pièces de métal de volume important et de l'équipement lourd (dont le bruit électrique est souvent en deçà de 30 kHz) [3]. L'antenne doit être suffisamment protégée de bris éventuels. La nature triaxiale du récepteur est primordiale car elle permet une détection nonobstant son orientation. Évidemment, ce dispositif ne détecte que les travailleurs portant une balise. Même si ce dispositif implique une diminution de la fréquence des fausses alarmes, il ne protège aucunement le travailleur sans balise ou avec une balise défectueuse. Compte tenu de la complexité et de la quantité de balises requises, ce système tend à être coûteux.

Les systèmes de détection comportant une caméra et un moniteur vidéo (sans reconnaissance d'objet) sont relativement simples. Toutefois une installation en hauteur est rarement possible pour les camions à bennes et cela présente des inconvénients en présence d'un soleil rasant [2].

Les systèmes de détection qui sont composés de plusieurs capteurs et que l'on nomme ici « multi systèmes », peuvent être simples ou complexes. Ces systèmes sont conçus de sorte à profiter des avantages de chacun des capteurs tout en remédiant aux inconvénients de chaque capteur pris individuellement. Dans le cas où la détection s'effectuerait sans l'aide du conducteur, une unité de fusion de données par traitement logicielle (logique booléenne ou autre) est nécessaire [5, 21]. La performance de détection d'un multisystème est normalement limitée par le capteur dont l'activation est la plus lente.

3.3 Évitement de collisions

Dans son ensemble, un système de détection de personnes comprend un capteur basé sur l'un des principes physiques décrits ci-haut ainsi qu'une alarme (visuelle et/ou sonore) permettant de signaler au conducteur d'un véhicule la présence d'un obstacle (humain ou non). L'objectif sous-jacent à cette étude est l'évitement de collision entre un véhicule en mouvement et une personne. Or, suite à la détection d'une personne et à l'émission d'un signal d'alarme, l'évitement de collision est fortement influencé par la vigilance du conducteur ainsi que par le temps d'arrêt du véhicule en mouvement. En fait, plus le temps de réaction du conducteur et la vitesse de recul sont faibles, meilleures sont les chances d'évitement. À l'inverse, une plus grande vitesse de recul nécessitera une plus longue distance de freinage. Idéalement, la distance de détection devrait augmenter en proportion de la vitesse de recul [21]. Cependant, un agrandissement de la zone de détection entraîne souvent la perception d'objets hors voie comme des obstacles et du fait même, une augmentation de la fréquence des fausses alarmes.

À titre d'information, la Figure 3 procure la distribution du temps de réaction d'un automobiliste lors d'une manœuvre de recul [20]. Ce temps de réaction est « optimiste » dans le sens où son amplitude est faible en comparaison avec d'autres travaux. Par exemple, la norme SAE-J1741 [13] tient compte d'un temps de réaction (pour la personne à risque) de l'ordre de 2 secondes. En considérant un temps de réaction moyen de l'ordre de 0,65s (voir Figure 3) et une vitesse de recul de 5km/h, le véhicule aura parcouru 0,90m avant que le conducteur ne réagisse au signal d'alarme (en fait, avant qu'il applique les freins). Si on emprunte un temps de réaction de 2s, le véhicule aura alors parcouru 2,7m avant l'application des freins.

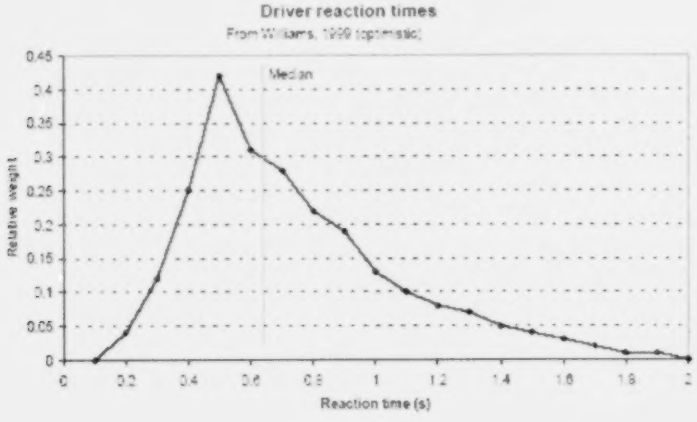

Figure 3 : Distribution du temps de réaction d'un conducteur (tiré de [20])

Tel qu'indiqué en [19] et [20], une distance de détection inférieure à 2 mètres est inefficace pour un véhicule reculant à une vitesse supérieure ou égale à 5km/h. En fait, le Tableau 1 montre le pourcentage de chance d'évitement selon la vitesse de recul, la distribution du temps de réaction donnée en Figure 3, un taux de décélération (pour une automobile) de 5 m/s^2 ainsi qu'un temps de détection de 0,2s. L'analyse considère tous les facteurs influençant l'évitement de la collision et conclut qu'une distance de détection de l'ordre de 4 mètres est plus appropriée car elle assure un évitement à 95 % pour une vitesse de recul de 8km/h. Cette approche illustre bien l'impact du choix technologique du moyen de détection sur les probabilités d'évitement.

À ce stade, nous ne disposons pas de données relatives au taux de décélération des véhicules de chantier de construction. Une étude permettant de générer de l'information comme celle illustrée à la Figure 3 et au Tableau 1 serait donc appropriée.

Tableau 1 : Proportion des collisions évitées par une automobile (tiré de [20])

Initial speed		Detection distance (m)							
km/h	m/s	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
1	0.28	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0.56	53%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
3	0.83	9%	75%	97%	100%	100%	100%	100%	100%
4	1.11	1%	47%	84%	97%	100%	100%	100%	100%
5	1.39	0%	15%	64%	87%	96%	100%	100%	100%
6	1.67	0%	3%	29%	72%	88%	96%	99%	100%
7	1.94	0%	0%	15%	52%	77%	90%	95%	99%
8	2.22	0%	0%	4%	31%	60%	79%	90%	95%
9	2.50	0%	0%	1%	12%	42%	65%	80%	92%
10	2.78	0%	0%	0%	4%	21%	48%	68%	81%
11	3.06	0%	0%	0%	1%	8%	31%	53%	69%
12	3.33	0%	0%	0%	0%	3%	14%	37%	56%
13	3.61	0%	0%	0%	0%	1%	5%	19%	41%
14	3.89	0%	0%	0%	0%	0%	1%	8%	24%
15	4.17	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3%	11%

Approx 95% value (km/h)	1	2	3	4	5	6	7	8

4. NORMES ET RÈGLEMENTS

Dans l'ensemble, six normes portant sur les alarmes de recul et les systèmes de détection ont été identifiées. Parmi celles-ci, on trouve les normes SAE-J994B, SAE-J1741, SAE-1446, ISO 7731, ISO 9533 ainsi qu'une norme de l'état de Washington aux «États-Unis d'Amérique. En général, en ce qui concerne les normes relatives aux alarmes de recul, le niveau de bruit de l'alarme doit excéder celui de l'environnement (ou du moins le niveau de bruit de l'équipement sur lequel est installée l'alarme). Nous effectuons un rapide survol des normes ci-haut mentionnées.

La norme ISO 7731, relative aux signaux de danger pour les lieux de travail, définit les critères nécessaires à la perception des signaux sonores de danger dans l'aire de réception, spécialement dans le cas où le niveau de bruit ambiant est élevé [14]. Parmi ces critères, on note le seuil de masquage, l'audibilité et les fréquences. Par seuil de masquage, on entend un niveau de pression acoustique pour lequel le signal auditif de danger est juste audible dans le bruit ambiant, en tenant compte des déficiences auditives des personnes exposées et de l'atténuation des protecteurs individuels contre le bruit. Un signal sonore est dit « audible » si le niveau de bruit pondéré A (voir l'explication en annexe) dépasse le niveau de bruit ambiant d'au moins 15 dB (13 dB dans le cas d'analyse par 1/3 d'octave). De plus, le niveau sonore pondéré du signal ne doit pas être inférieur à 65 dB. Si le niveau sonore pondéré A du bruit ambiant dans l'aire de réception du signal dépasse 110 dB, il est recommandé de ne pas utiliser uniquement des signaux auditifs de danger. Le signal auditif de danger doit être basé sur des fréquences se situant dans la gamme de 300 à 3000 Hz et doit avoir une énergie suffisante dans la gamme des fréquences inférieures à 1500 Hz pour répondre aux besoins des personnes ayant une perte auditive ou portant des protecteurs individuels contre le bruit. En annexe, nous référons à cette norme afin de déterminer si les signaux sonores des alarmes de recul sont audibles.

La norme SAE-J994B [25] procure des spécifications pour les alarmes de recul seules. En ce sens, elles sont indépendantes de l'installation de l'alarme sur le véhicule et conséquemment cette norme ne garantit pas l'audibilité du signal d'alarme à l'arrière du véhicule [6]. La section suivante présente certains résultats expérimentaux qui mettent en relief les exigences des normes ISO 7731 et SAE-J994B.

Contrairement aux normes précédentes, les normes SAE-J1446 et ISO 9533 décrivent les exigences du niveau de bruit des alarmes une fois installées sur un véhicule de construction [26, 27]. Trois types de mesures de niveau de bruit doivent être complétés avec le véhicule en mode stationnaire : (a) une mesure de bruit en l'absence d'alarme et à l'arrière du véhicule dont le moteur tourne à plein régime, (b) une mesure de bruit en présence de l'alarme et à l'arrière du véhicule dont le moteur tourne au ralenti ou est arrêté et (c) une mesure de bruit à l'emplacement du conducteur avec l'alarme en fonction. La norme exige que les critères suivants soient satisfaits :

(1) le niveau de bruit (pondéré A) trouvé lors des mesures décrites en (b) doit être supérieur ou égal à celui obtenu lors des mesures faites en (a) et

(2) le niveau de bruit indiqué en (c) ne doit pas excéder de 3 dB celui mesuré en l'absence de l'alarme et lorsque le moteur tourne à plein régime.

Il est à noter que la norme SAE-J1446 a récemment été remplacée par la norme ISO 9533.

L'état de Washington a récemment émis (en date du 1er juin 2004) un nouveau règlement portant sur les alarmes de recul et dispositifs de détection de personnes [17]. En résumé, un conducteur de camion à benne doit avoir un signaleur pour signifier qu'une procédure de recul est sécuritaire ou doit être équipé d'un dispositif tel une caméra vidéo qui procure une vue entière de la zone derrière le camion. Une partie pertinente du texte se lit comme suit :

> "Before backing a dump truck, the driver must determine that no one is currently in the backing zone (a cone of 50 feet long and 35.9 feet wide centered with the rear of the truck) and it is reasonable to expect that no employee(s) will enter the backing zone while operating the dump truck in reverse. If employee(s) are in the backing zone or it is reasonable to expect that an employee(s) will enter the backing zone, you must make sure the truck is backed up only when: (i) The vehicle has an operable automatic reverse signal alarm which is audible above the surrounding noise level and audible no less than fifteen feet from the rear of the vehicle; and (ii) you must make sure that an observer signals that it is safe to back or that an operable mechanical device that provides the driver a full view behind the dump truck."

La norme SAE J1741 représente l'unique norme qui soit dédiée aux systèmes de détection de personnes et à leur dispositif d'alarme [13]. De plus, elle est spécifiquement rédigée pour les systèmes installés sur les véhicules hors-routes du domaine de la construction ou d'usage industriel général. Cette norme stipule les critères permettant de tester les systèmes générant une alarme lors du recul des véhicules en question. Les principales spécifications sont les suivantes :

(i) l'alarme ne doit s'actionner que si une personne/obstacle est dans la zone de détection ;

(ii) le système de détection doit satisfaire tous les critères spécifiés sous toutes les conditions environnementales possibles (pluie, neige, poussière, vents violents, etc.) ;

(iii) le système de détection doit avoir un taux de détection de 100 % lorsque les tests sont effectués avec le mannequin proposé et en accord avec la zone de détection appropriée ;

(iv) le taux de fausses alarmes ne doit pas excéder 10 % de l'ensemble des alarmes.

La norme comporte également d'autres spécifications portant sur l'alarme sonore dans la cabine du véhicule ainsi que sur le déclenchement de l'alarme de recul.

Dans l'ensemble des normes répertoriées dans l'ouvrage [18], les dispositifs de détection de personnes doivent être à défaillance sécuritaire (ou « fail safe ») et satisfaire le critère de défaut unique. Ce dernier critère implique qu'une seule défaillance d'un composant ne doit pas empêcher la mise à l'arrêt de la machine par le dispositif de détection et doit empêcher la remise en marche de la machine une fois qu'elle a été arrêtée et ce, jusqu'à ce que le défaut du dispositif de détection ait été corrigé.

La Figure 4 illustre la région conique localisée à l'arrière d'un véhicule et à l'intérieur de laquelle les mesures de niveau de bruit sont souvent prises et où la détection de personnes doit avoir lieu. Le Tableau 2 résume les dimensions maximales de cette région conique selon les

normes en vigueur. Il faut mentionner que les mesures de bruit sont parfois prises à la périphérie de la zone de forme conique.

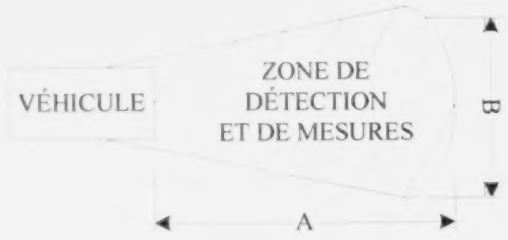

Figure 4 : Forme de la zone de détection/mesures localisée à l'arrière d'un véhicule

Tableau 2 : Dimensions maximales de la zone localisée à l'arrière d'un véhicule

Norme	Dimension A (m)	Dimension B (m)
Washington [17]	16	6,8
SAE-J1741 [13]	15,2	10,8
ISO 9533 [27]	7	9,8

5. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Cette section comporte un résumé des divers essais et résultats expérimentaux trouvés dans la littérature. L'emphase a été mise sur les dispositifs qui sont commercialement disponibles et sur leur installation potentielle sur des véhicules de chantiers de construction. Le texte est structuré selon l'analyse des propriétés des capteurs (simple, multisystème ou comparée) et il débute par une brève section de référence sur les alarmes de recul.

5.1 Alarmes sonores de recul

Au cours de cette étude, des mesures de bruit ont été prises sur des chantiers de construction. Les résultats de ces mesures et une discussion sont présentés en annexe. À titre de comparaison avec ces mesures, les mesures de bruit reportées en [12] ont été réalisées par un carroyage au pas de 5 mètres (1 mètre en champ proche) dans une zone de mesure de 30 mètres de longueur et 25 mètres de largeur derrière le véhicule, alors que les microphones de mesure se situaient à 1.6 mètre du sol et dirigés vers la source de bruit. Les résultats ne satisfont pas les recommandations de la norme internationale ISO 7731, car (i) le signal de l'alarme de recul ne présente pas une énergie suffisante dans la gamme des fréquences inférieures à 1500 Hz afin de répondre aux besoins des personnes ayant une perte auditive ou portant des protecteurs individuels contre le bruit, et (ii) l'écart entre le bruit généré par le véhicule seul et celui produit par le véhicule et l'alarme est inférieur à 15 dB à tous les points de mesure.

Les mesures effectuées sur le terrain et reportées en [6] démontrent que la norme SAE J994B possède d'importantes lacunes. Entre autres choses, la norme ne prévient pas l'existence des phénomènes suivants :

(a) Même si l'alarme de recul respecte un certain niveau de pression sonore à 4 pieds de distance de l'alarme et aligné face à celle-ci, ce niveau peut ne pas être maintenu sur des axes s'éloignant de l'axe central ;

(b) Lors des mesures sur le terrain, des changements de 10-15 dBA ont été constatés entre deux points espacés de quelques dizaines de centimètres. En présence d'un tel phénomène, le travailleur pourrait avoir l'impression que le véhicule s'éloigne alors que l'inverse peut arriver ;

(c) Il peut aussi y avoir un phénomène physique d'annulation d'ondes attribuable à la réflexion et diffraction rendant ainsi le signal sonore moins perceptible ;

(d) La norme SAE J994B ne précise pas l'emplacement de l'alarme de recul. Il s'ensuit souvent un emplacement non adéquat des alarmes de recul pouvant accentuer les phénomènes décrits en (a), (b) et (c).

À ces observations, il faut ajouter que le point (d) a été corroboré lors des prises de mesure sur deux sites de construction (voir annexe). En effet, à l'exception d'un seul camion à benne, tous ceux qui ont été inspectés (entre 25 et 30 au total) avaient leur alarme de recul obstruée par le pare-chocs arrière métallique (et souvent dirigé vers l'avant du véhicule). Il faut ajouter que

lorsque l'alarme est visible à l'arrière du véhicule (e.g., près d'un feu arrière) les interférences acoustiques sont significativement diminuées [6].

5.2 Ultrasons

Dans une publication récente [7], plusieurs systèmes ont été testés sur des camions pour détecter la présence d'obstacles réels (une personne, une porte de garage, une automobile ou un carton) à l'arrière et sur le côté d'un véhicule. Parmi les systèmes testés, on retrouve des systèmes commerciaux ainsi qu'un prototype munis de capteurs à ultrasons dont les détails figurent au tableau 3 ainsi qu'un système avec caméra « Rearvision » de Sony.

Tableau 3 : Nature des capteurs testés en [7]

Type	Sonar	Sonar	Sonar	Sonar	Sonar
Marque	Safety Technology	Dynatech	EBI	Armatron	Technodyne
Modèle	Safety Sensor	Scan II	Hindsight 20/20	Echovision	Protex CV 2000

Les capteurs à ultrasons couvrent une grande partie de l'espace arrière du véhicule mais moindre que celle couverte par une caméra. Le taux de détection de l'ensemble des capteurs lorsqu'un piéton marche au travers d'une zone derrière le véhicule se situe entre 39 % et 92 %. Dans l'ensemble des tests en présence d'une personne, les capteurs échouent à la détection dans 3 % à 6 % des cas. À l'inverse, de 3 % à 22 % de toutes les alarmes de détection sont fausses. De plus, il subsiste des différences entre les tests statiques, où le sujet humain s'approche d'un véhicule stationnaire et les tests dynamiques, où le sujet humain est immobile et le véhicule s'en approche. Le tableau 8 contient certains détails techniques portant sur les dispositifs du tableau 3.

Les expérimentations confirment la sensibilité du principe de détection aux conditions environnementales. En effet, les résultats varient de jour en jour (quoique la variation diminue en fonction de la distance) et sont affectés par les changements de température, d'humidité, de vitesse et d'orientation du vent, de la présence de neige, de pluie, de brouillard et de glace ou saletés sur le capteur. Du point de vue de l'installation, le capteur est difficile à installer et son raccordement à la benne et la remorque demeure fragile comme en témoignent plusieurs pannes qui sont survenues. Il n'existe pas de moyen facile pour déterminer si le capteur fonctionne. De plus, le conducteur doit continuellement calibrer le dispositif par essais et erreurs.

Un signal d'avertissement sonore est probablement inefficace pour les conducteurs ayant 40dB de perte d'acuité auditive. Par ailleurs, l'emplacement d'un avertisseur visuel est critique et devrait s'harmoniser avec la direction du regard du conducteur, c'est-à-dire près des miroirs latéraux.

5.3 Capteurs à effet capacitif

La compagnie Gordon Engineering fabrique le Proxagard PC1000 (au prix de 1 200 $ US) qui fonctionne par effet capacitif. Toutefois, aucun article scientifique mettant ce type de capteur à l'essai n'a pu être identifié.

5.4 Caméra

Il existe plusieurs témoignages sur l'utilisation d'un système de détection ou de supervision composée d'une caméra. Le texte qui suit présente un résumé de ces témoignages.

Dans un article récent, l'auteur fait mention d'un système comportant des caméras fixées à l'arrière d'un véhicule de construction et reliées à un moniteur de contrôle situé dans la cabine de conduite [2]. Dans ce cas particulier, les caméras sont surélevées, ce qui les rend plus efficaces. Un système similaire [7] implique que la détection de personnes se fasse grâce au conducteur qui doit suivre sur un moniteur vidéo le déroulement de la scène à l'arrière du véhicule. Ce système requiert toutefois un éclairage adéquat. Le Mine Safety and Health Administration (MSHA) a également démontré que des caméras vidéos améliorent la sécurité autour des véhicules de chantiers de construction, surtout lors des manœuvres de recul [11]. Depuis lors, des caméras résistantes aux chocs ont été installées sur divers types de véhicules. En plus, un télémètre affiche la distance au moniteur vidéo, ce qui permet au conducteur d'évaluer la distance séparant le véhicule d'un obstacle. Une autre recherche [10] a expérimenté l'usage d'une caméra sur les camions miniers. Une lentille avec un grand angle a été recommandée afin d'avoir un champ de vision élargi. Toutefois, les distorsions encourues par ce type de lentille rendent l'estimation des distances plus complexe. Selon l'auteur, les caméras en noir et blanc semblent mieux adaptées pour les véhicules pouvant opérer de jour ou de nuit. À titre d'exemple d'utilisation de caméras sur une automobile, le modèle concept Rosemeyer de Audi remplace tous les miroirs par un système vidéo procurant au conducteur une vue arrière et latérale. De plus, certains systèmes vidéos possèdent un moniteur intégré dans le rétroviseur qui s'active lors de la mise en marche arrière du véhicule [20].

Un autre système de détection est composé d'une seule caméra munie d'un filtre infrarouge et d'une balise passive, rigide, avec réflecteurs et portée par le sujet à détecter [4]. La présence est déterminée par la localisation des réflecteurs dans l'espace. Le filtre infrarouge a pour but de ne laisser passer que la lumière réfléchie par la balise de sorte que l'information concernant le reste de la scène est éliminée. Suite à des essais, l'erreur de mesure obtenue à une distance de 2 mètres est de l'ordre de 4 %. Toutefois, un éclairage extérieur peut altérer la performance du système.

5.5 Capteurs à ondes radios

Lors d'essais d'un radar à micro-ondes et à effet Doppler durant le recul de camions, le système a détecté une personne se trouvant à une distance de 4 à 6 mètres [18]. L'auteur d'une étude récente a expérimenté des systèmes de détection radio disponibles commercialement ainsi que des prototypes sur des camions à benne miniers [9]. En tout, quatre systèmes radar et quatre systèmes d'identification par radiofréquences (identif. RF) ont été évalués. Les systèmes commerciaux sont présentés au tableau 4 (le tableau 8 procure un complément d'information).

Tableau 4 : Nature des capteurs testés en [9]

Type	Radar Doppler	Radar micro-ondes	Radar Doppler	Identif. RF	Identif. RF
Marque	Knapp Company	Ogden	Sense Technologies	Mintronics	Nautilus
Modèle	Radar backup 201	Intelligent radar	Guardian Alert	Body Guard	Buddy System

Dans l'ensemble, les deux types de dispositifs (radar et identification par radiofréquence) ont des résultats prometteurs mais davantage de développement est requis. L'obstacle majeur à l'utilisation d'un radar est l'occurrence des fausses alarmes. Par essais et erreurs, il est possible de sélectionner la largeur de bande, la portée, et la position de montage de sorte à réduire la fréquence des fausses alarmes, sans toutefois les éliminer complètement. Les systèmes d'identification par radiofréquences sont plus robustes aux conditions sévères et ne semblent pas affectés par la température, la chaleur et une accumulation modérée de la poussière ou de boue sur le capteur. Compte tenu qu'aucun des systèmes testés n'était conçu pour être installé sur un camion, la durabilité des capteurs à long terme est mise en question.

En [10], l'auteur met à l'essai le prototype d'un radar à large bande d'une conception peu coûteuse et compacte. Selon les expérimentations, la zone de détection s'étend jusqu'à 15 mètres à l'arrière du véhicule. Le capteur n'est pas sensible aux conditions environnementales et n'a généré aucune fausse alarme. Toutefois des améliorations doivent être apportées au système afin de le rendre moins sensible à la hauteur de son installation.

Les radars sont généralement moins coûteux (de 500 $ US à 2 000 $ US) que les systèmes à identification par radiofréquences pour lesquels le coût de chaque balise est de l'ordre de 2 $ US à 500 $ US, alors que le prix du lecteur varie de 6 000 $ US à 20 000 $ US.

5.6 Capteur à champ magnétique

Lors de travaux récents, le NIOSH a développé un système de détection nommé HASARD (Hazardous Area Signaling and Ranging Device) [3]. Ce dispositif se compose d'une unité émettrice d'un champ magnétique à basses fréquences (60 kHz) ainsi que de balises actives. Chaque balise comporte un récepteur trois-axes. À titre d'information, le MSHA (Mine Safety and Health Administration) est en cours d'essais sur un système de détection avec champ magnétique pour de l'équipement mobile minier. De l'information supplémentaire peut être trouvée au site internet cité en [22].

5.7 Études comparatives

L'auteur de la recherche publiée en [8] évalue plusieurs capteurs lors d'expérimentations effectuées durant deux mois sur un camion à benne (au cours de l'été) et sur une épandeuse à sable (durant l'hiver). Les détails des dispositifs commerciaux figure au tableau 5. Les dispositifs sélectionnés ont été retenus sur la base de leur capacité à fonctionner dans un environnement sévère et malgré la présence de pluie et de neige. Parmi les prérequis pour passer le test de détection, une personne accroupie près des pneus d'un camion stationnaire doit être détectée. Au cours de cette étude, l'emphase est mise sur l'installation de tels dispositifs.

Tableau 5 : Nature des capteurs testés en [8]

Type	Radar impulsionel	camera	sonar
Marque	Guardian Alert	Clarion	EBI
Modèle	Preview	Intec	Hindsight

Il est particulièrement complexe de déterminer une position et un angle de montage pour un capteur sur un camion à benne tout en ayant une zone de détection adéquate. Par exemple, un système radar est susceptible de détecter des pièces de métal à proximité telles que le pare-chocs arrière ou la porte basculante. De plus, le haut niveau de vibrations et de chocs que subit la porte basculante élimine cet emplacement comme option de montage. Quant à la caméra, un support aérien au-dessus de la porte basculante s'est avéré inefficace pour l'étape de chargement et la détection d'une personne accroupie près des roues arrières. La caméra a également été installée en haut de la boîte du côté droit. Cependant, il a été recommandé de changer la caméra de côté afin d'avoir une meilleure vue de la zone cachée à l'arrière du véhicule. Si le capteur est localisé dans les coins inférieurs de la boîte, il subsiste un risque potentiel d'endommagement lors du déchargement du contenu de la boîte. Lorsque le camion tire une charge additionnelle, la fréquence des fausses alarmes pourrait être réduite en exigeant que la connexion mécanique et/ou électrique désactive le capteur.

Lors d'essais, la distance maximale détectée par le sonar a été de l'ordre de 3 mètres. Les principales difficultés rencontrées pour l'ensemble des capteurs surviennent en présence du froid, de la neige et d'un environnement encombré de plusieurs obstacles. En effet, tout dispositif doit être dégagé de saletés afin de bien fonctionner. À titre d'exemple, un nettoyage de lentille de caméra par quart de travail est habituellement suffisant. Un système muni d'un radar ou sonar procure un signal de présence d'obstacles et en ce sens, il est plus actif qu'une caméra. Toutefois, la caméra est très appréciée car elle procure une vue de la zone située à l'arrière du véhicule. L'usage d'une caméra la nuit est difficile car l'éclairage est inadéquat. Un système comportant une caméra et un capteur d'un autre type peut avoir plusieurs avantages, comme celui de laisser le conducteur vérifier la source d'une alarme. Dans l'ensemble, il est recommandé que tout capteur soit muni d'une boîte de protection chauffée ou tout autre mécanisme afin d'empêcher l'accumulation de neige, de glace ou de saletés. De plus, il faut développer une méthode afin de réduire l'occurrence de fausses alarmes.

L'étude reportée en [19] et [20] porte sur la détection d'enfants lors du recul d'automobiles. Les objets utilisés pour la détection de personnes ont une hauteur de 600 mm, 800 mm, et 1 000 mm. En tout, trois capteurs à ultrasons et un radar micro-ondes à effet Doppler ont été testés (voir tableau 6). Le prix de ces capteurs varie de 50 $ US à 400 $ US.

Tableau 6 : Nature des capteurs testés en [20]

Type	Ultrason	Ultrason	Ultrason	Radar micro-ondes, Doppler
Marque	Williams Geddes	MKP/P/L	Global Accents	S&S Distributing
Modèle	Reverse sensor	Smart Park	Safe Reverse	Guardian Alert

Les résultats expérimentaux figurent au tableau 7, où l'on note que le système « Guardian Alert » possède la plus importante distance maximale de détection, soit 3 mètres. Les données relatives à l'évitement ont été calculées sur la base du temps de réactions du conducteur (environ 0,65 s), du temps de détection du capteur (0,2 s) et du taux de décélération du véhicule (environ 5 m/s^2) établis en [20] et ce pour une automobile et non un véhicule de chantiers de construction (voir la figure 3 et le tableau 1). Pour les capteurs à ultrasons, la distance de détection peut possiblement être augmentée, mais il s'ensuivra une augmentation de la fréquence des fausses alarmes. On retrouve au tableau 8 certains détails techniques portant sur les dispositifs présentés au tableau 5 et du tableau 6.

Tableau 7 : Résultats expérimentaux [20]

Modèle	Distance max.	% évitement à 5km/h	Vitesse maximale pour 95 % d'évitement
Guardian Alert	3 m	100 %	6 km/h
Smart Pack	1,5 m	64 %	3 km/h
Safe Reverse	1 m	15 %	2 km/h
Reverse Sensor	1 m	15 %	2 km/h

Dans l'ensemble, aucun dispositif ne peut couvrir entièrement la zone cachée à l'arrière d'une automobile. De plus, on recommande que la vitesse de recul en km/h n'excède pas le double de la distance de détection en mètres.

Les travaux effectués en [21] portent sur les dispositifs de détection et d'évitement de personnes et de véhicules pour les autobus scolaires. Au cours de ces travaux, les auteurs ont comparé et testé plusieurs systèmes commerciaux de détection. Notamment, on a étudié deux radars à effet Doppler à micro-ondes, soit : VORAD (pour « Vehicule Detection and Driver Alert system ») développé par Vorad Safety Systems et, FOREWARN produit par Delco Electronics. L'intérêt pour le système de détection de véhicules VORAD vient de son unité de traitement de données qui surveille de manière simultanée les trois véhicules les plus près. Cette unité vérifie également les défaillances du système toutes les 15 secondes. De plus, si une défaillance est détectée une alarme est émise au conducteur pour l'en aviser et le système conserve cette défaillance en mémoire jusqu'à ce qu'il ait eu correction. La zone de détection du système FOREWARN est approximativement de 4 mètres par 5 mètres. Les auteurs ont également testé le prototype d'un multisystème qui s'appelle ADMS et qui est composé d'une caméra et de deux capteurs infrarouges dont la portée est de 3m. La caméra est dotée d'un grand angle, ce qui a comme effet de grossir les objets passant devant elle.

5.8 Multisystèmes

En [5], les auteurs ont testé une combinaison de capteurs sur de l'équipement agricole en mode stationnaire alors qu'un sujet humain s'approchait du véhicule. Parmi les combinaisons de capteurs testées, on retrouve (i) un capteur à infrarouge passif, (ii) un capteur à micro-ondes à effet Doppler / capteur à infrarouge et (iii) un capteur à micro-ondes à effet Doppler / capteur à

micro-ondes réfléchi. Afin de réduire l'occurrence de fausses alarmes, une logique booléenne se basant sur le statut de l'ensemble des capteurs a été développée. Typiquement, deux ou plus de deux capteurs doivent être activés afin d'actionner l'alarme du système de détection. Les tests ont été effectués sur des sujets humains portant des vêtements d'été et d'hiver. En 822 essais, aucune fausse alarme n'est survenue et aucun capteur n'a manqué une détection. Les capteurs ne sont pas affectés par les vibrations de l'équipement en mode stationnaire et la nature des vêtements altère peu la détection. Toutefois, l'angle d'approche a un impact sur la performance de détection. Il est recommandé d'utiliser le capteur décrit en (iii) avec large champ en plus d'un capteur du type (i) ou plusieurs capteurs du type (iii).

Les auteurs des travaux réalisés en [10, 20] ont également combiné et testé un capteur à courte portée et abordable (Guardian Alert et Ogden) avec une caméra à grand angle. Une vitesse maximale de recul de l'ordre de 10km/h est appropriée pour le multisystème en question. De plus, la distance de détection pour la caméra varie de 5 à 8 mètres. L'un de ces multisystèmes coûte environ 800 $ US avec installation incluse.

6. DISCUSSION

Parmi les technologies s'appliquant aux véhicules mobiles, on note les capteurs basés sur les ultrasons, les ondes radios, les micro-ondes, le champ magnétique et la vision. En fait, une large part de la technologie de détection est dictée par la physique des ondes. En ce qui concerne la détection d'un attribut humain (rayonnement thermique, formes, etc.) par un capteur spécifique (infrarouge, système de vision, etc.), davantage de développement est nécessaire, surtout si l'on considère un environnement aussi peu structuré qu'un chantier de construction. Conséquemment, presque tous les dispositifs commercialement disponibles sont en fait des détecteurs d'obstacles.

La problématique commune à tous les systèmes de détection d'obstacle demeure celle de la réduction des fausses alarmes. En effet, il existe un compromis entre la dimension de la zone de détection et l'occurrence des fausses alarmes. Typiquement, plus une zone de détection est large plus la fréquence des fausses alarmes est élevée. Dans l'ordre des recommandations générales, quelques auteurs suggèrent que tout capteur soit muni d'une boîte de protection chauffée ou tout autre mécanisme afin d'empêcher l'accumulation de neige, de glace ou de saletés, sans compromettre le bon fonctionnement du dispositif de détection. Du point de vue des risques pour la santé, certaines préoccupations ont été émises en ce qui concerne l'exposition des personnes aux infrarouges (effet thermique pour les yeux), aux micro-ondes et au champ magnétique.

De par leur principe de fonctionnement, certains capteurs à ondes tels que ceux à infrarouges, à laser ou à ultrasons sont sensibles aux conditions environnementales. En général, les diverses expérimentations sur des systèmes commerciaux confirment cet état de chose. À l'inverse, la technologie radar ainsi que la technologie d'identification par balises (radiofréquence ou magnétique) ont l'avantage de pouvoir fonctionner en présence de diverses conditions (humidité, pluie, variation de température, etc.).

Parmi les caractéristiques particulières à quelques types de systèmes de détection, on note :

(a) qu'il existe une zone sans détection à proximité des capteurs à ultrasons;

(b) que l'usage d'un seul capteur radar à effet Doppler n'est pas recommandé car il ne détecte que les obstacles en mouvement;

(c) que les systèmes d'identification par radiofréquences peuvent subir des interférences;

(d) que les systèmes avec balises (radiofréquence ou champ magnétique) procurent une illusion de sécurité même lors d'une défaillance de la balise ou du transmetteur;

(e) que l'usage d'une caméra requiert un éclairage adéquat et que les caméras opérant en noir et blanc sont préférables pour les véhicules utilisés de jour et de nuit. Le moniteur vidéo peut également être muni d'un télémètre indiquant la distance;

(f) que les radars à large bande présentent plusieurs avantages intéressants.

Tableau 8 : Systèmes de détection commerciaux

#	Modèle & Marque	Type	Distance max. de détection*	Mouvement requis	Fausses alarmes	Complexité installation	Coût	Référence
1	Safety Technology, Safety Sensor	Sonar	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
2	Dynatech, Scan II	Sonar	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
3	EBI, Hindsight 20/20	Sonar	3	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
4	Armatron, Echovision	Sonar	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
5	Technodyne, Protex CV 2000	Sonar	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
6	Williams Geddes, Reverse sensor	Sonar, ultrason	1	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
7	MKP/P/L, Smart Park	Sonar, ultrason	1.5	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
8	Global Accents, Safe Reverse	Sonar, ultrason	1	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
9	Vorad, Vorad Safety Systems	Radar Doppler	N/D	N/D	N/D	N/D	500-2K $US	N/D
10	Knapp Company, Radar backup 201	Radar Doppler	6.5	Oui	Non fréquent	Moyenne	2K-8K $US	N/D
11	Forewarn, Delco Electronics	Radar Doppler	5	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
12	Ogden, Intelligent radar	Radar, FMCW	7.7	Oui	Aucune	Faible	Moins de 2000 $US	www.pla-net.uk.net/ogden/index.htm
13	Sense Technologies, Guardian Alert	Radar Doppler	3	Oui	Fréquent	Faible	Moins de 2000 $US	www.guardianalert.com
14	Preco Inc, Preview	Radar impulsion	6.7	Non	Aucune	Moyenne	Moins de 2000 $US	www.preco.com
15	Mintronics, Body Guard	Identification RF	7.7	Non	Aucune	Élevée	2-500 $US/balise 6K-20K $US/lecteur	N/D
16	Nautilus, Buddy System	Identification RF	15	Non	Aucune	Élevée	2-500 $US/balise 6K-20K $US/lecteur	www.nautilusinternational.com
17	Clarion, Intec	Caméra	8	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
18	Gordon Engineering, Proxagard PC1000	Effet capacitif	N/D	N/D	N/D	N/D	1200 $US	www.gordoneng.com
19	Caméra et Guardian, Alert [20]	Caméra et radar	5	N/D	N/D	N/D	800 $US	N/D
20	Sensor Vision [10]	Caméra et radar	8	N/D	Aucune	N/D	N/D	www.visiontechniques.co.uk

* = Les tests ne sont pas homogènes, certains sont réalisés avec véhicule mobile et personne stationnaire tandis que d'autres tests ont la combinaison inverse.
N/D = non-disponible, RF = radio-fréquence, FMCW = fréquence modulée et émission continue, 2K = 2000.

D'une manière globale, le Tableau 8 contient l'information technique découlant des divers travaux expérimentaux [7, 8, 9, 10, 20, 21] effectués sur des systèmes de détection d'obstacle. Au total, cette étude a permis de répertorier vingt systèmes de détection différents, dont huit capteurs à ultrasons, six radars, deux dispositifs d'identification par radiofréquences, une caméra, un capteur à effet capacitif ainsi que deux multisystèmes. En plus de leur sensibilité aux conditions environnementales, les capteurs à infrarouge ont la plus faible portée. On note aussi que la portée des systèmes à identification par radiofréquences excède celle des radars. Nous constatons également que le coût des systèmes de détection d'obstacles est généralement d'un autre ordre de grandeur que celui des alarmes sonores (dont le coût approximatif est de 30 $).

Cette étude à également permis d'identifier des spécifications additionnelles touchant les systèmes de détection de personnes. De manière abrégée, les recommandations exigent que :

(i) le taux de détection soit de 100 % tout en n'excédant pas 10 % de fausses alarmes (SAE-J1741);

(ii) la distance de détection augmente avec la vitesse de recul;

(iii) le système détecte une personne accroupie à proximité des roues arrières du véhicule;

(iv) la distance de détection (pour une automobile en mode recul) soit d'au moins 4m;

(v) la vitesse de recul en km/h n'excède pas le double de la distance de détection en mètres.

Pour bien mesurer la sévérité des critères ci-haut mentionnés, aucun des capteurs à ultrasons testés en [7] ne satisfait le taux de détection (entre 39 % et 92 %) et le taux de fausses alarmes (entre 3 % et 22 %). De plus, seuls les dispositifs d'identification par radiofréquences semblent satisfaire la portée de 4 mètres. Cependant, ces systèmes ne sont pas entièrement sécuritaires dans l'éventualité où survient une panne de balise ou de transmetteur. En présence de capteurs à plus faible portée (ultrason ou radar), il est d'autant plus important de restreindre la vitesse de recul du véhicule.

Afin de réduire l'occurrence des fausses alarmes, plusieurs groupes de recherche optent pour les multisystèmes. Les multisystèmes les plus courants comportent une caméra ainsi qu'un capteur d'un autre type (radar, ultrasons, etc.). L'avantage d'une telle combinaison provient du fait que la caméra permet au conducteur du véhicule de vérifier la source d'une alarme sans descendre de son véhicule. Dans le cas échéant où divers capteurs sont présents et que la détection est indépendante du conducteur, il peut être nécessaire d'effectuer une fusion des données provenant des capteurs. Un compromis intéressant pourrait être d'utiliser plusieurs types de radars (dont un radar Doppler et un impulsionnel ou à large bande) afin de détecter les obstacles mobiles ou non.

Il est particulièrement complexe de déterminer une position et un angle de montage pour un capteur sur un camion à benne tout en ayant une zone de détection adéquate. Par exemple, un système radar est susceptible de détecter des pièces de métal à proximité telles que le pare-chocs arrière ou la porte basculante. De plus, le haut niveau de vibrations et de chocs que subit la porte basculante élimine cet emplacement comme option de montage. Quant à l'utilisation d'une caméra, il a été recommandé d'installer celle-ci en haut de la boîte du côté gauche afin d'avoir

une meilleure vue de la zone cachée à l'arrière du véhicule. L'installation de l'avertisseur (sonore ou visuel) dans la cabine du véhicule est tout aussi cruciale pour l'évitement de collision et devrait être sélectionnée avec soin. Par exemple, un avertisseur localisé à proximité des miroirs latéraux respecte les gestes et le champ de vision habituels d'un conducteur.

7. CONCLUSION

Cette étude visait à acquérir des connaissances sur les dispositifs pouvant détecter des personnes lors des manœuvres de recul des véhicules de chantiers de construction. Ces systèmes n'ont pas comme vocation de remplacer les alarmes sonores de recul, car seules ces dernières permettent de conserver une certaine notion des mouvements des véhicules lourds circulant à proximité. En fait, la combinaison d'une alarme sonore de recul et d'un système de détection de personne présente un avantage majeur. En effet, un tel amalgame conduit à un partage des responsabilités de la sécurité entre les conducteurs des véhicules et le personnel oeuvrant à proximité.

Des visites de chantiers ont permis une familiarisation avec l'usage et la configuration des alarmes sonore de recul sur divers types de véhicules. À notre surprise, presque la totalité des camions à benne inspectés avaient leur alarme installée derrière le pare-chocs arrière. En fait, la norme SAE J994B, à laquelle réfère le Code de sécurité pour les travaux de construction, possède d'importantes lacunes. Notamment, cette norme ne procure aucun critère relatif à l'environnement et à l'installation de l'alarme, et ce, malgré le fait qu'une alarme visible (par exemple, près des feux arrières) assure un minimum d'interférences acoustiques pouvant affecter sa perception [6]. Cela peut possiblement expliquer le fait que deux des douze mesures de niveau de bruit d'alarme effectuées sur des camions à benne soient à peine plus élevées que la mesure du bruit ambiant. À l'inverse, les normes SAE-J1446 et ISO 9533 vont dans le même sens que l'ouvrage [6] en spécifiant les niveaux de bruit qui doivent être perçus à l'arrière des véhicules équipés d'une alarme sonore. Il est également intéressant de constater que la norme ISO 9533 requiert un certain niveau de bruit à l'emplacement du conducteur. Une autre constatation inattendue vient du fait que, dans bien des cas, l'alarme sonore de recul est actionnée manuellement par le conducteur. Si l'alarme est automatiquement activée par la mise en marche arrière du véhicule via la transmission, cela évite que le camionneur oublie son alarme une fois sur le chantier, comme cela est survenu lors d'une de nos visites de sites de construction.

Malgré le fait que plusieurs principes de détection d'obstacles existent, chacune de ces technologies possède des limites qui leur sont propres et qui parfois restreignent leur usage sur les véhicules de chantier de construction. À ce sujet, une vingtaine de systèmes de détection commerciaux a été répertoriée, dont certains d'entre eux ont même été testés sur des véhicules de chantiers de construction. Le principal critère de performance pour tout système de détection demeure la faible survenue des fausses alarmes, qui signalent une présence alors qu'aucun obstacle n'est présent, et qui, par le fait même, mine la confiance du conducteur envers le système de détection au point que celui-ci en vienne à ignorer les avertissements du système de détection. À cet effet, plusieurs auteurs proposent des combinaisons des capteurs de nature différente afin de profiter des avantages de chacun d'entre eux tout en diminuant la fréquence des fausses alarmes. Une combinaison particulièrement populaire se compose d'une caméra et d'un radar.

Un nombre considérable d'observations ont été faites sur les difficultés d'installation des capteurs sur divers véhicules et plus particulièrement sur les camions à bennes. De plus, l'emplacement et la nature du signal d'avertissement adressé au conducteur doivent être soigneusement sélectionnés.

Il est opportun de rappeler que l'objectif sous-jacent à cette étude est l'évitement de collision entre un véhicule en mouvement et une personne se trouvant à proximité. Or, il existe de nombreux facteurs influençant l'évitement de collision tels que la vitesse de recul du véhicule, le temps de détection du capteur, le temps de réaction du conducteur et le taux de décélération du véhicule. Afin d'avoir une meilleure appréciation des chances d'évitement de collision, il serait préférable d'élaborer une étude permettant de déterminer le temps de réaction des conducteurs ainsi que le taux de décélération des véhicules de chantier de construction, notamment les camions à benne. Ces résultats pourront alors être mis en commun avec une technologie de détection afin d'évaluer les capacités d'évitement de collision.

8. RÉFÉRENCES

[1] Côté, J., « Détection et évitement d'obstacles pour les véhicules automatisés : état de l'art et applications minières », Mémoire de maîtrise, Département de génie électrique et de génie informatique, École Polytechnique, 1992.

[2] Gautier, J.-L. et Rebaud, P., « Manœuvres de recul. Des caméras installées sur les véhicules pour sauver des vies », Prévention BTP, no 52, p. 24-26, mai 2003.

[3] Schiffbauer, W.H., "An active proximity warning system for surface and underground mining applications", SME Annual Meeting, 26-28 février, Denver, Colorado, 2001.

[4] Raducanu, B., Subramanian, S. et Markopoulos, P., "Human Presence Detection by Smart Devices" , In *Proceedings of the 4th International Symposium on Engineering of Intelligent Systems, EIS2004, Island of Madeira, Portugal*, ICSC Academic Press, Canada, 2004.

[5] Shutske, J., Gilbert, B., Chaplin, J. et Gunderson, P. "Sensor Evaluation for Human Presence Detection", University of Minnesota, 1998.

[6] Laroche, C., « Détermination des caractéristiques acoustiques optimales des alarmes de recul », Rapport R-117, IRSST, décembre 1995.

[7] Garrott, W.R., Flick, M.A. et Marzae, E.N., "Hardware Evaluation of Heavy Truck Side and Rear Object Detection Systems", *Object Detection, Collision Warning and Avoidance Systems*, US Society of Automotive Engineers, Automotive Electronics Series, PT-70, Paper 951010, p. 3-27, 1998.

[8] Ruff, T.M., "Evaluation of systems to monitor blind areas behind trucks used in road construction and maintenance: Phase I", Report of Investigation 9660, Department of Health and Human Services, National Institute for Occupational Safety and Health, Publication 2003-113, février 2003.

[9] Ruff, T.M., "Test Results of Collision Warning Systems for Surface Mining Dump Trucks", Report of Investigation 9652, Department of Health and Human Services, National Institute for Occupational Safety and Health, mai 2000.

[10] Ruff, T.M., "Test Results of Collision Warning Systems on Off-Highway Dump Trucks: Phase II", Report of Investigation 9654, Department of Health and Human Services, National Institute for Occupational Safety and Health, Publication 2001-100, novembre 2000.

[11] "Watch your back: Rear-vision cameras help improve safety in the work zone", *Roads & Bridges*, p. 46-47, septembre 2003.

[12] Taupin, J., Smolick, H.J., Lefaure, J.M., Barbier, J.P. et Jusselin, F., « Le recul des engins de travaux publics – une nouvelle optique. Étude de l'audibilité et de la discrimination du klaxon

de recul d'un engin de chantier, marqué par le bruit de son moteur », Revue de médecine du travail, Ergonomie dans le BTP, n° 2, 1993.

[13] "Discriminating Back-up Alarm System Standard, Surface Vehicle Standard", norme SAE J1741, The Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space, 1999.

[14] Norme Internationale, ISO 7731-1986 (F), « Signaux de danger pour les lieux de travail – Signaux auditifs de danger », 1986.

[15] Saint-Amant, M., « Problématique de la sécurité des humains dans une mine utilisant des véhicules autoguidés : un survol », Rapport EPM/RT-92/11, Centre Canadien d'automatisation et de robotique minière, École Polytechnique de Montréal, 1992.

[16] Hurteau, R., Saint-Amant, M. et Côté, J., « Étude des systèmes de détection d'humains et d'anticollision pour des véhicules opérant en milieu minier », IRSST, rapport R-109, septembre 1995.

[17] "Motor Vehicles, Mechanized Equipment and Marine Operations, Chapter 296-155 – Part M", Safety Standards for Construction Work, Washington State Department of Labor and Industries, mai 2004.

[18] Ghosh, H. et Paques, J.-J., « Détection du personnel par dispositifs électroniques sensibles », Bilan de connaissances, IRSST, rapport B-032, août 1991.

[19] Paine, M., MacBeth, A. et Henderson, M., "The danger to young pedestrian from reversing motor vehicles", résumé de la référence [20].

[20] Paine, M et Henderson, M., "Devices to reduce the risks to young pedestrians from reversing motor vehicles", Motor Accidents Authority of NSW, Australia, mars 2001.

[21] Kaffel, M. et Dubé, Y., « Systèmes de sécurité pour autobus scolaires », Université du Québec à Trois-Rivières, septembre 1996.

[22] http://www.msha.gov/accident_prevention/initiatives/proximityprotection/proximityprotection.asp.

[23] Code de sécurité pour les travaux de construction, c. S-2.1, r.6, 3 août 2004.

[24] http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/blanquet/synophys/33onelm/33onelm.htm#8.

[25] "Alarm Backup Electric Performance, Test and Application", norme SAE-J994B, Society of Automotive Engineers, 1985.

[26] "On-Machine Alarm Test and Evaluation Procedure for Construction and General Purpose Industrial Machinery", norme SAE-J1446, Surface Vehicle Standard, émise en 1983 et annulée en mai 2003.

[27] Norme française NF ISO 9533 : 1995, « Engins de terrassement -- Avertisseurs sonores de marche avant et de marche arrière montés sur engins -- Méthode d'essai acoustique », 1995.

9. ANNEXES

À l'aide de la CSST, deux chantiers de construction de la région de Montréal ont été visités. Ces visites ont permis de répertorier certaines conditions et contraintes propres aux chantiers de construction au Québec. Notamment, nous avons pu récolter de l'information pertinente sur le niveau de bruit dans les chantiers ainsi que sur le type et la configuration des alarmes sonores. Pour la prise de niveaux de bruit, un professionnel scientifique a utilisé l'équipement de l'Institut (Sound Analyzer Type 2260, Bruel & Kjaer) ainsi que le logiciel approprié (Sound Analysis Software BZ7210).

9.1 Niveau de bruit - Pondération A

Notre oreille est plus sensible aux moyennes fréquences qu'aux basses et hautes fréquences. Pour tenir compte de ce comportement physiologique de l'oreille humaine, les instruments de mesure sont équipés d'un filtre dit « de pondération A » (indiqué par une mesure en dBA) dont la réponse en fréquence est la même que celle de l'oreille. Les niveaux de bruit pondéré A sont utiles pour comparer les bruits entre eux puisqu'ils tiennent compte de la perception que les individus ont du bruit. La Figure 5 représente le facteur de pondération en fonction de la fréquence.

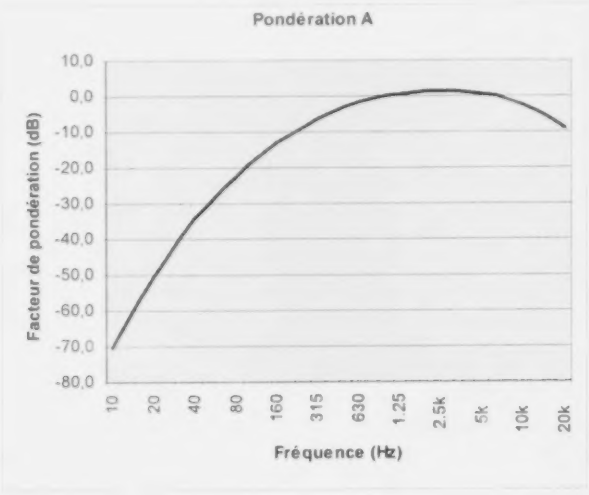

Figure 5 : Niveau de bruit avec pondération A

9.2 Chantier de Construction #1

9.2.1 Contexte

Une visite du chantier routier de réfection d'une autoroute a eu lieu le mercredi 14 juillet 2004. Cette visite visait à faire une appréciation globale du niveau de bruit ambiant sur un chantier de construction d'envergure ainsi qu'une collecte d'information sur les dispositions (positionnement, environnement, etc.) des alarmes de recul des camions. À titre de référence, ce site peut impliquer quotidiennement une flotte comportant environ 80 camions. La Figure 8 représente bien l'emplacement du site qui se trouve entre une autoroute, une voie de service et souvent surplombé de viaducs.

L'accès au site ainsi que le recueil d'information ont été facilités par le personnel d'une firme de génie-conseil. La visite dura environ deux heures et comporta plusieurs séries de mesures de niveaux de bruit en différentes localités et en présence de divers camions à benne basculante. Pour chaque situation, deux types de mesure du bruit ont été pris. La première mesure servait à évaluer le bruit de fond ambiant en l'absence d'alarme de recul, tandis que la seconde mesure comportait une alarme de recul (prise à une distance approximative de 3 mètres à l'arrière du véhicule et centré avec celui-ci). Dans les deux cas, le niveau de bruit est enregistré en fréquence en 1/3 d'octave. Il est à noter que ces prises de mesures ont des similarités avec les recommandations de la norme internationale ISO 7731. Dans le présent cas, le bruit de fond ambiant se compose du bruit des véhicules circulant sur l'autoroute et la voie de service (voir Figure 8), du bruit de l'équipement du chantier de construction et parfois du passage d'avions, car le chantier est localisé à proximité de l'aéroport Pierre-Elliot Trudeau à Dorval.

9.2.2 Observations

Les camionneurs interrogés (environ une douzaine) ne connaissent pas le modèle ou la marque de leur alarme de recul. D'ailleurs, cette information n'a pu être recueillie directement car les alarmes de recul sont souvent installées derrière le pare-chocs et orientées vers l'avant du véhicule (plutôt que vers l'arrière du véhicule où se trouve le personnel à risque). La plupart des alarmes sont disposées ainsi afin d'être protégées des saletés (poussière, pluie, etc.) pouvant nuire à leur fonctionnement. La Figure 7 montre un exemple de ce type de positionnement alors que la Figure 6 montre le seul camion rencontré qui possédait des alarmes de recul visibles. Dans ce dernier cas, le camion était muni de deux alarmes de recul (au lieu d'une seule comme l'exige le règlement) dont l'une possède la description suivante : Evacuator Plus, 12-48 VDC, 112 dB type A (SAE J994), Target Tech. Par ailleurs, on nous a informés que le coût unitaire pour de telles alarmes se situe entre 17 $ et 29 $. On a souvent noté la présence de phares qui s'activent automatiquement lors du recul des camions. Certains camions en ont même deux (voir Figure 7) et d'autre pas du tout.

Lors de cette visite nous avons noté deux véhicules dont les alarmes de recul n'étaient pas en fonction. Dans l'un des cas, l'alarme était déconnectée et fut reconnecté aisément par le camionneur, alors que dans l'autre cas le camionneur a manuellement actionné l'alarme à partir de sa cabine. En fait, dans bien des cas l'alarme de recul n'est pas automatique et son activation nécessite l'intervention du camionneur. L'employé de la firme de génie-conseil explique cet état

de chose par le fait que plusieurs camions/camionneurs peuvent être sollicités à travailler par les soirs et qu'un certain règlement de la ville de Montréal empêcherait l'utilisation d'alarmes sonores à certaines heures de la nuit. L'existence d'un tel règlement n'a pu être confirmé. Deux « brokers » ont été contactés afin de corroborer l'information. Ces derniers ont offert une raison plus probable venant du fait que plusieurs conducteurs de camions à benne habitent dans un quartier résidentiel. Afin de ne pas avoir de plaintes des résidents relativement à l'alarme de recul (surtout lorsqu'ils reviennent en soirée), les conducteurs installent un commutateur leur permettant de désactiver l'alarme à partir de leur cabine. Cependant, il arrive souvent que le camionneur oublie d'activer son alarme une fois sur le chantier. De plus, une musique ou un air climatisé trop fort empêche le camionneur de distinguer, à partir de sa cabine, si son alarme sonore est en fonction ou non.

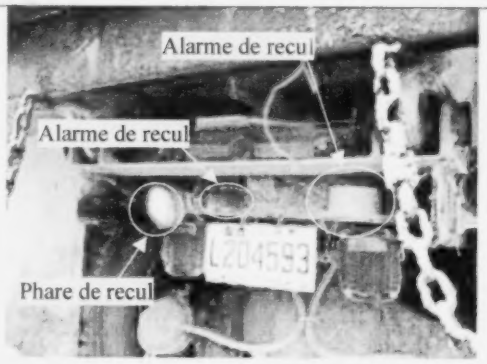

Figure 6 : Arrière d'un camion à benne

Figure 7 : Arrière d'un second camion à benne

Figure 8 : Aperçu du chantier

Figure 9 : Second aperçu du chantier

9.2.3 Résultats

Le Tableau 9 présente les valeurs moyennes d'amplitude du bruit (en dBA) enregistrées avec et sans alarme lors de huit mesures effectuées à des emplacements différents. Tel qu'illustré par la Figure **10**, le niveau de bruit ambiant sur le chantier (en l'absence d'alarme de recul) est relativement homogène et semble indépendant du positionnement sur le chantier. Lors des mesures effectuées en présence d'alarme, on dénote une fréquence distincte associée à l'alarme de l'ordre de 1.25kHz avec une précision de 1/3 d'octave (voir Figure 11). De plus, dans le cas des mesures #5 et #6, la présence d'alarme est difficilement perceptible à partir des valeurs moyennes.

Tableau 9 : Valeurs moyennes d'amplitude de bruit (dBA)

Essai	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sans alarme	71.9	78.2	74.9	74.6	74.3	76.7	78	79
Avec alarme	81.5	90.9	86.3	83.5	74.9	79.7	95.1	94.5

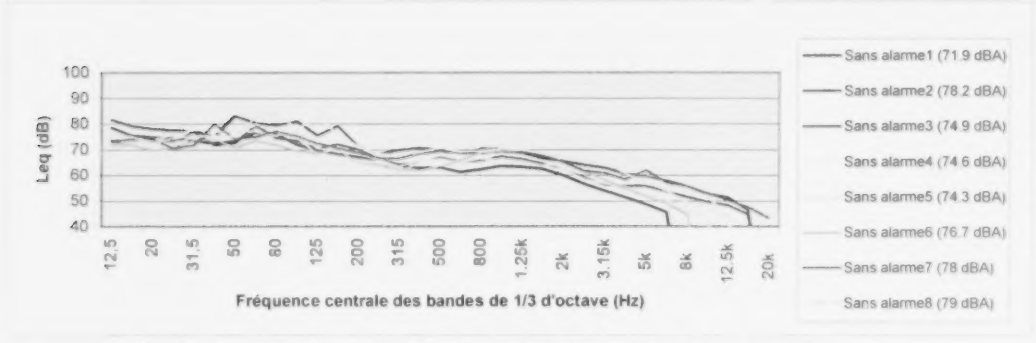

Figure 10 : Niveau continu équivalent de bruit sans alarme de recul

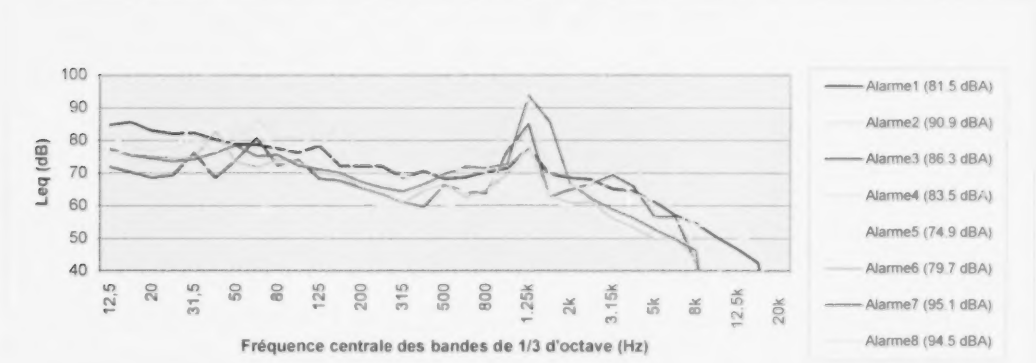

Figure 11 : Niveau continu équivalent de bruit avec alarme de recul

9.3 Chantier de construction #2

9.3.1 Contexte

Une seconde visite a eu lieu le mercredi 4 août 2004. Ce site compte plusieurs chantiers de construction à proximité d'unités de production du secteur chimique. On y recense d'importants travaux d'excavation et d'extension d'unité de production faisant appel à environ 300 travailleurs de divers métiers (électriciens, maçons, etc.). De ce fait, divers équipements mobiles circulent sur le site tels que des grues, des rouleaux compacteurs, des pelles excavatrices, des béliers mécaniques, des camions à benne, des camionnettes, des chariots élévateurs ainsi que des plates-formes mobiles (voir Tableau 10).

Tableau 10 : Type d'équipement avec alarmes de recul

Mesures	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
Équipement	Camion benne	Camion grue	Plate-forme	Camion benne	Rouleau compacteur	Bélier mécanique	Camion benne	Camion grue	Chariot élévateur
Équipement	Camionnette	Camion benne	---	---	---	---	---	---	---

L'accès au site ainsi que le recueil d'information ont été facilités par le personnel du site. La visite dura environ trois heures et comporta plusieurs séries de mesures de niveaux de bruit en différentes localités. Les mesures ont été prises selon une démarche identique à celle décrite pour la visite du premier chantier de construction.

9.3.2 Observations

Tous les conducteurs de camion à benne rencontrés ont été interrogés et dans tous les cas l'alarme était inaccessible car installée derrière le pare-chocs. De plus, les alarmes sont toutes activées automatiquement lors de la mise en marche arrière du véhicule. La Figure 12, la Figure 13 ainsi que la Figure 14 montrent des exemples d'alarmes installées par le manufacturier sur une plate-forme mobile, un rouleau compacteur et une pelle mécanique.

Figure 12 : Rouleau compacteur

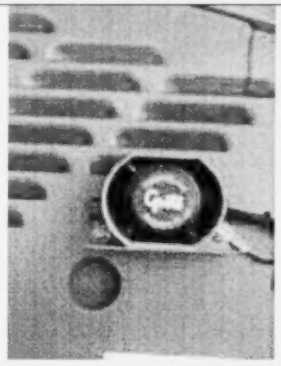

Figure 13 : Plate-forme mobile

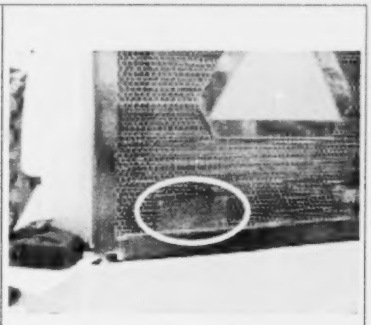

Figure 14 : Pelle mécanique

9.3.3 Résultats

Le Tableau 11 présente les valeurs moyennes d'amplitude du bruit (en dBA) enregistré avec et sans alarme lors de neuf mesures effectuées à des emplacements différents. À la différence du chantier routier, le bruit ambiant est principalement composé d'un bruit à amplitude constante et provenant des unités de production. Les résultats semblent indiquer que le bruit ambiant sur ce chantier est plus élevé que celui à proximité d'une autoroute (plage de 71.9 à 79dB comparativement à une plage de 75.3 à 82.1dB). Le spectre d'amplitude moyenne du bruit généré par les alarmes sur le présent chantier (de 80.4 à 99dB) est également supérieur à celui du premier chantier (de 75.9 à 95.1dB). Aussi, seul le chariot élévateur possède une alarme dont le niveau de bruit est du même ordre de grandeur que le niveau de bruit ambiant.

Tableau 11 : Valeurs moyennes d'amplitude de bruit (dBA)

Essai	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
Sans alarme	75.3	82.1	75.5	75.9	79.6	81.5	76.9	80.8	80.6
Avec alarme	84.2	91.4	99.0	92.6	97.9	86.8	90.3	88	80.4
Avec alarme	90.5	86.7	---	---	---	---	---	---	---

Tel qu'illustré par la Figure 15, le niveau de bruit ambiant sur le chantier (en l'absence d'alarme de recul) est relativement homogène et semble indépendant du positionnement sur le chantier. Tout comme les résultats du chantier routier, les mesures effectuées en présence d'alarme (voir Figure 16) indiquent une fréquence distincte associée à l'alarme de l'ordre de 1.25kHz avec une précision de 1/3 d'octave.

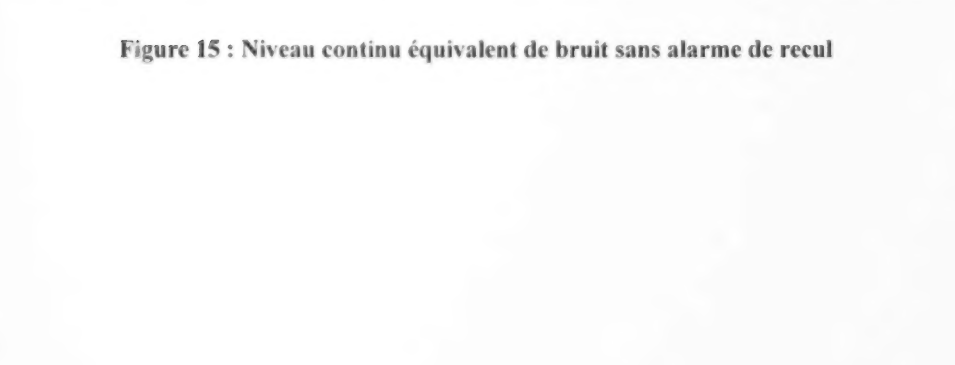

Figure 15 : Niveau continu équivalent de bruit sans alarme de recul

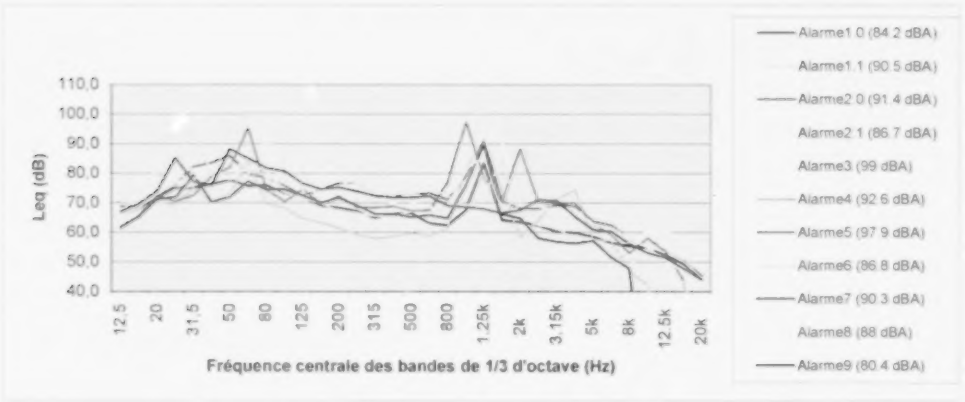

Figure 16 : Niveau continu équivalent de bruit avec alarme de recul